

学位論文要旨

全節巻スイッチトリラクタンスモータの 高性能化に関する研究

*Study on performance improvement
for full pitch winding switched reluctance motor*

金沢大学大学院自然科学研究科

機械科学専攻

学 籍 番 号 1524032016

氏 名 石川 智一

主任指導教員名 佐藤 英明

提 出 年 月 2018 年 9 月

Electric and hybrid vehicles (EV/HEV) are attractive choice due to its potential in reducing CO₂ emissions. Traction motors that use high performance rare earth magnets are mainstream motors for mass production EV and HEV at the present. On the other hand, the rare earth material has resource problems due to future expansion. For that reason, Switched Reluctance Motor (SRM) which do not have rare-earth magnets have been considered for use as a vehicle traction motor in electric and hybrid electric vehicle applications. Particularly, the full pitch winding SRMs are suitable since it has a high torque performance. However, the phase current increases in the high speed drive region and has problems such as low efficiency in the practical driving region. In this paper, we propose a control method the control corresponding to the drive point of the full pitch winding SRM, in order to improve the power in the high speed drive region and the efficiency in the practical drive region. Then, the performance improvement effect will be clarified. This aims to apply full pitch winding SRM to automotive traction motor.

本研究は、地球温暖化の抑制に対する社会的関心の高まりから、自動車分野におけるハイブリッド車(HEV)や電気自動車(EV)等の次世代自動車の普及に向けて重要となる車両の電動化技術の向上に貢献することを狙いとしている。将来にわたる次世代自動車の普及拡大に対して、電動化技術のキーコンポーネントの一つであるモータに適用されるレアアース金属の資源問題に鑑み、レアアースを用いない自動車駆動用モータの適用を推し進めるべく取り組んできた。本論文では、レアアースを用いないモータの中でも体積当たりのトルクが高い全節巻 SRM の駆動用モータへの適用に関する研究成果についてまとめた。これまで自動車駆動用途として全節巻 SRM を適用検討するにあたり、高速駆動領域における損失の拡大や、常用駆動領域における相対的な効率の低下により見送られてきた。本研究において提案した手法によれば、高速駆動領域の電流量を低減し、かつ常用駆動領域において磁氣的損失である鉄損を低減することが可能であることを明らかにした。

第 1 章では、自動車駆動用モータのレアアースフリー化を検討するにあたり、レアアースを用いないモータの特性を比較した。自動車の走行負荷は、発進時の大トルク要求から、定常走行、さらには高速走行や追越し等広範囲な負荷条件を有する。この負荷条件を踏まえ、自動車駆動用モータとして重要となる特性は、最大トルクにおける出力を高速駆動領域まで同等に確保することである。本研究の対象とした全節巻 SRM は、レアアースフリーモータの中でも体積あたりの発生トルクが高く、高速駆動領域までの出力特性が良好である特徴を有することが明らかになった。一方、高速駆動領域において高い出力を得るための電流が過大であること、常用駆動領域として必要な軽負荷領域の駆動効率が低いことが実用上の課題となる。これらの課題から、全節巻 SRM は自動車駆動用途において広く普及するには至らなかったものである。以上から、全節巻 SRM の自動車駆動用途への普及を目指し、高性能化を図ることを研究のねらいとした。

第 2 章では、全節巻 SRM を自動車駆動用に適用するために、現状量産されているハイブリッド車両の駆動用モータを対象として、モータ体積、および出力性能が同一となるように設計した。全節巻 SRM は、磁石式モータに比べて磁気回路あたりの発生トルクが低い。ここで、磁気回路のモータ軸方向厚さを拡張した。一方、平角巻線を成形し整列させることにより、巻線が占める体積比率を低減し対象モータと同一体積を実現し、高性能化を検討するための基準となる全節巻 SRM を定義した。

第3章では、全節巻SRMの駆動法において高速駆動に伴い低下する電流の応答性に着眼し、巻線へ励磁する電流の通電幅を狭小化した制御法を考案し、その基本的な考え方を明らかにした。提案した制御法は、全節巻SRMにおける基底回転数を超える高速駆動領域において、出力の向上と励磁電流の低減を両立することが可能である。さらに、基底回転数条件における相電流値を最大値として、高速駆動領域の出力向上効果をシミュレーション上にて確認し、全節巻SRMの高出力化のポテンシャルを明らかにした。これによりレアアースを用いない全節巻SRMをEV駆動用モータとして適用を検討するにあたり、必要となる駆動特性を十分に確保することが可能である。

第4章では、全節巻SRMを自動車駆動用として適用する時に課題となる実用駆動領域の効率向上をねらって、当該領域における損失の支配要因となる鉄損を低減する制御法を考案し、その基本的な考え方を明らかにした。矩形波状の相電流により駆動されるSRMは、その電流成分により鉄心内部の磁束に高調波成分が多く含まれることにより鉄損の増大を引き起こしている。本研究では、印加した電圧波形に対して磁束波形が一意に決定される点に着目して、電圧波形を制御対象とした制御法を考案した。さらに全節巻SRMの構成から、制御可能なパラメータは各相の巻線への印加電圧であるため、鉄心磁束を直接制御することはできなかった。そこで、各鉄心磁束成分を制御するための仮想電圧成分を定義し、これらの重ね合わせにより各相への印加電圧波形を導出した。本制御法により、鉄心磁束の高調波成分の低減効果を実機にて確認した。また、実用駆動領域における鉄損低減効果を実機にて確認し、従来のSRM駆動法に対して軽負荷領域の効率向上が可能となることを明らかにした。

本研究の成果により、今後普及が進む次世代自動車の駆動用モータにおいてレアアースフリー化を促進することが可能となり、車両の電動化推進、ひいては自動車分野の二酸化炭素の排出量削減をよりすすめることができ、地球温暖化の防止に貢献できる。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

全節巻スイッチトリラクタンスモータの高性能化に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 機械科学 専攻

(2) 氏 名 ^{ふり} ^{がな} ^{いしかわ} ^{ともかず}
石川 智一

3. 審査結果の要旨（600～650 字）

当該学位論文に関して平成 30 年 8 月 10 日午前に第 1 回論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料に関する検討を加えた。また、同日午後の口頭発表後に第 2 回論文審査委員会を開催して協議の結果、以下の通り判定した。

地球環境保護の観点から、自動車分野においても燃費向上の要求に応えるため、ハイブリッド車や電気自動車などへの車両の電動化が急速に進んでいる。それらの駆動には主に埋込磁石型同期モータが使われており、広範囲な出力特性を実現するため多量の永久磁石が必要とされる。しかし、永久磁石に必要なレアアース金属は安定供給が懸念され、それを用いないモータが強く求められている。

本論文では、永久磁石を用いない全節巻スイッチトリラクタンスモータ（SRM）を対象とし、現状量産されている自動車用駆動モータ仕様を実現するために、高速時において銅損を増加させずに一定出力を確保できる構造と通電パターンを、軽負荷時においては鉄損の磁束の高調波成分低減に着目した制御手法を、明らかにしている。本成果は、従来の全節巻 SRM の制御の考えを変えており、今後の制御仕様に与える影響は大きい。

以上より本論文は、今後重要性が高まる電動車の駆動モータの安定供給への寄与、かつモータの制御仕様への工学的寄与が高く、博士（工学）の学位に値するものと判定した。

4. 審査結果 (1) 判 定（いずれかに○印） 合 格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博 士（ 工 学 ）